

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta strojní**  
**Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení**

**Zkušební zařízení pneumatických rotačních motorů**

**Test Equipment for Pneumatic Gear Motor**

Student:

Škrabal Jiří

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jaroslav Kopáček, Csc.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jiří Škrabal**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**  
Téma: **Zkušební zařízení pneumatických rotačních motorů**  
**Test Equipment for Pneumatic Gear Motors**

### Zásady pro vypracování:

Vypracujte projekt zkušebního zařízení pneumatických rotačních motorů pro rozsah výkonů do 6 kW a otáčky max. 3000 za min.

Projekt bude obsahovat:

- přehled vyráběných rotačních pneumomotorů a jejich parametry,
- charakteristiky rotačních pneumomotorů a způsoby jejich měření,
- měřicí zařízení, metody a přístroje pro měření základních parametrů (p, Q, n, M, P, T),
- alternativy brzdícího zařízení, jejich hodnocení a volba pro dané zadání,
- schéma zkušebního zařízení.

### Seznam doporučené odborné literatury:

KOPÁČEK, J.: *Pneumatické mechanismy. D.1. Pneumatické prvky a systémy*. Skripta VŠB- TU Ostrava, 1996.

KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. SNTL Praha 1990.

PIVOŇKA, J. a kol. *Tekutinové mechanismy*. SNTL Praha 1987.

ZINĚVIČ, V.D. a kol. *Poršněvyje i šestěrnnyje pněvmodvigatěli gornych mašin* (v ruštině), Moskva 1982, str. 170 - 175.

Prospekty, katalogy pneumomotorů, měřicích zařízení, snímačů, zkušebních zařízení.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jaroslav Kopáček, CSc.**

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Piskorz**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010

doc. RNDr. Milada Kozubková, CSc.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2010



.....  
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářské práce bude v elektronické uložena v Ústřední knihovně VŠB - TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 11/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2010



.....

Podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Škrabal

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Rozvadovice 28, 784 01 Litovel

**ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

ŠKRABAL, J. *Zkušební zařízení pneumatických rotačních motorů: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2010, 37 s. Vedoucí práce: Kopáček, J.

Bakalářská práce se zabývá návrhem zkušebního zařízení pneumatických rotačních motorů. První část práce je věnována přehledu vyráběných pneumomotorů, jejich charakteristikami a parametry. Z těchto pneumomotorů jsou vybrány ty, které odpovídají zadaným parametrům. V dalších částech jsou uvedeny měřicí zařízení, metody a přístroje pro měření základních parametrů. Dále jsou uvedeny alternativy brzdícího zařízení a volba pro dané zadání. Výsledkem práce je návrh schéma a popis zkušebního zařízení, které se skládá ze zvolených součástí podle parametrů zadání.

**ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

ŠKRABAL, J. *Test Equipment for Pneumatic Gear Motor: bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB - Technical Univesity of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2010, 37 p. Thesis head: Kopáček, J.

This bachelor work deals with an engineering design of an experimental air-operated rotary engine mechanism. The first part of the work features a survey of existing rotary engines, their characteristics and parameters. Of this assortment, rotary engine have been chosen corresponding with the given parameters. The following parts of the work deal with measuring devices, methods and tools used for measuring the basic parameters. Also presented are options for braking mechanisms and the choice of target under the given requirements. This diploma work results then in an engineering design and description of an experimental mechanism which consists of selected parts corresponding with the parameters as requested

**Obsah:**

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ .....	7
0 ÚVOD .....	8
1 PŘEHLED TYPŮ ROTAČNÍCH PNEUMATICKÝCH MOTORŮ, JEJICH PARAMETRŮ A CHARAKTERISTIK.....	9
1.1 Rotační pneumatické motory (pneumomotory) .....	9
1.2 Pístové pneumatické motory .....	10
1.3 Zubové pneumatické motory.....	12
1.4 Lamelové pneumatické motory .....	14
2 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ, METODY A PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ ( $p$ , $\Delta p$ , $Q$ , $n$ , $M$ , $P$ , $T$ ).....	17
2.1 Zkoušení pneumatických prvků a systémů .....	17
2.2 Druhy zkoušek a měření.....	17
2.3 Všeobecné metody měření .....	18
2.4 Přístroje a snímače pro měření základních parametrů .....	19
2.4.1 Měření tlaku .....	19
2.4.2 Měření průtoku .....	20
2.4.3 Měření otáček.....	21
2.4.4 Měření momentů .....	21
2.4.5 Měření teploty .....	23
2.4.6 Snímače Hydrotechnik .....	23
2.4.7 Zhodnocení snímačů .....	25
3 BRZDÍCÍ ZAŘÍZENÍ – ALTERNATIVY .....	26
3.1 Elektrické dynamometry .....	26
3.2 Hydrostatické brzdy .....	27
3.3 Třecí brzdy .....	28
3.3.1 Čelistové brzdy.....	28
3.3.2 Brzdy s osovým tlakem.....	29
3.3.3 Zhodnocení brzd.....	30
4 SCHÉMA ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ .....	31
4.1 Popis zkušebního zařízení pro jeden směr otáčení.....	31
4.2 Popis zkušebního zařízení pro dva směry otáčení.....	32
5 Závěr.....	35
6 ZDROJE .....	36

## Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	jednotky
D	průměr	mm
F	síla	N
$F_N$	normálová síla	N
$F_T$	třecí síla	N
M	moment	N·m
$M_u$	ubrzdný moment	N·m
$M_Z$	brzdny moment	N·m
$M_{Zmin}$	minimální brzdny moment	N·m
P	výkon	kW
Q	průtok	$m^3s^{-1}$
$R_S$	střední poloměr	mm
T	teplota	K
V	objem	mm
n	otáčky	$min^{-1}$
p	tlak	Pa
$\Delta p$	tlakový spád	Pa
q	objemové ztráty	$m^3kW^{-1}h^{-1}$
$\pi$	Rudolfovo číslo	-
$\varphi$	součinitel tření	-

## **0 ÚVOD**

Rotační pneumatické motory vyrábí řada světových společností např., SMC, Festo, Parker adt.. Každý z těchto pneumatických motorů má jiné parametry, které se se zatížením mění. Z těchto důvodů je třeba mít zkušební zařízení vybavené snímači parametrů a zařízením vyvozujícím zátěž. Cílem bakalářské práce je navrhnout schéma zkušebního zařízení, které měří parametry pneumatických motorů a pomocí vhodných měřících přístrojů vyhodnocuje jejich charakteristiky při určitém zatížení do PC.



# 1 PŘEHLED TYPŮ ROTAČNÍCH PNEUMATICKÝCH MOTORŮ, JEJICH PARAMETRŮ A CHARAKTERISTIK

## 1.1 Rotační pneumatické motory (pneumomotory)

Rotační pneumomotory patří do kategorie objemových motorů, v nichž se tlaková energie vzduchu předává na pohyblivý pracovní prvek (píst, bok zubu, lamela), a ten dále vykonává vratný nebo rotační pohyb.

Mezi rotační pneumatické motory patří motory

- lamelové a zubové,
- motory s vratným pohybem pístu jsou motory pístové.

Pneumomotory se v pohonech strojů používají poměrně málo vzhledem k tomu, že mají nízké celkové energetické účinnosti pneumatického pohonu. V porovnání pohonu elektrického a hydraulického pohonu s pohonem pneumatickým je jejich účinnost výrazně nižší. I když mají pneumomotory nízkou účinnost, tak mají mnoho dalších výhod ve srovnání s uvedenými typy [1].

Výhody:

- jednoduchost konstrukce vlastního motoru, ovládacích a řídicích prvků a poměrně nízké nároky na jakost opracování materiálu,
- jednoduchost obsluhy a spolehlivost provozu,
- možnost provozu v prostředí prašném, s nebezpečím výbuchu, vlhkém, pod vodou a v prostředí s korozivními účinky,
- možnost akumulace energie, tlumení rázů a kmitání v systému pohonu,
- necitlivost na rázy v rozvodném systému tlakové energie i rázy od poháněného mechanismu,
- schopnost trvale přenášet maximální přetížení až k úplnému zastavení pohonu bez potřeby zvláštního zařízení a bez nebezpečí zničení motoru, motor se přitom nezahřívá a tím umožňuje okamžitý rozběh,
- v uzavřených prostorách např. v hlubinných dolech odpadní vzduch z motorů zpříjemňuje ovzduší,

- přizpůsobivost provozu mechanismů, u kterých dochází k častým reverzacím, značným změnám zatížení, ke kmitáním a vibracím,
- možnost automatizace [1].

Nevýhody:

- nízká účinnost (bylo zmíněno),
- nákladná výroba stlačeného vzduchu,
- nutnost zbavení nečistot ze vzduchu a olejovou mlhu nasytit vlhkostí, aby bylo zajištěno mazání pohyblivých částí motoru,
- obtížná přesnost regulace otáček a jejich udržování v konstantní hodnotě,
- hlučnost [1].

Tab. 1 Účinnosti různých motorů [1]

Druhy motorů	účinnost
elektromotory	$\eta_E \doteq 0,92$
hydromotory	$\eta_H \doteq 0,88$
pneumomotory	$\eta_P \doteq 0,25 \text{ až } 0,35$
spalovací motory	$\eta_S \doteq 0,25 \text{ až } 0,35$

## 1.2 Pístové pneumatické motory

Pístové pneumomotory pracují s vratným pohybem pístů, které jsou umístěny ve válcích uspořádaných kolem osy rotace motoru radiálně viz obr. 1. V jejich provedení je využito klikového mechanismu nebo mechanismu s excentrem, který umožňuje dosažení vysokého záběrového momentu.

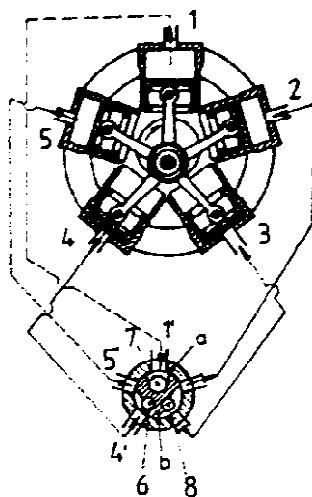
Radiální pístové pneumomotory se vyrábějí v rozsahu výkonu od 0,5 do 50 kW, běžně pro výkony od 2 do 15 kW.

Rozsah otáček pneumomotoru je obvykle od 350 do 1500 min<sup>-1</sup>, pracovní tlak od 0,4 do 0,6 MPa. Písty ve válcích se dají dobře utěsnit, proto mají tyto pneumomotory minimální objemové ztráty. Jejich specifická spotřeba činí 45 až 65 m<sup>3</sup>.kW<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>.

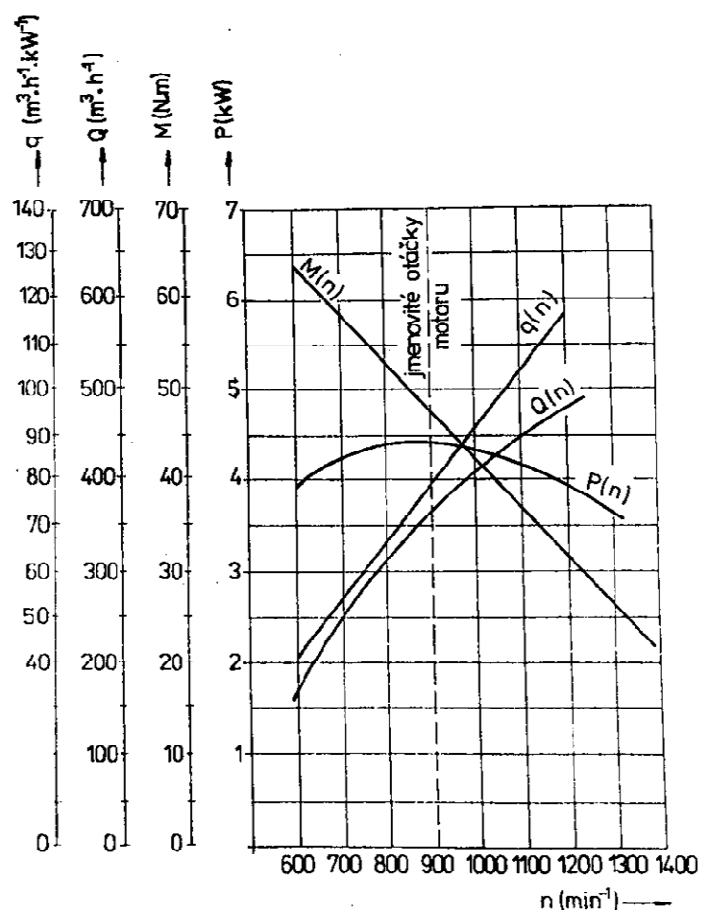
Složitost konstrukce pístových pneumomotorů ve srovnání s dále uvedenými typy je dána nutností přesného řízení průtoku stlačeného a odpadního vzduchu u jednotlivých

válců. Nejčastěji se používá rotačního válcového šoupátka, jehož pohyb je odvozen od pohybu hřídele motoru.

Tyto pneumomotory vyrábí řada společnost, např. v SRN-ATLAS Copco, GARDNER Denver, v Japonsku společnost TAIYO v rozsahu výkonů 0,2 do 15 kW, otáček od 50 do  $1500 \text{ min}^{-1}$  a momentem při pracovním tlaku 0,6 MPa od 1 do 1000 N·m. Jejich spotřeba činí od 40 do  $80 \text{ m}^3 \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  [1].



Obr. 1 Radiální pístový pneumomotor [1]



Obr. 2 Charakteristika radiálního pístového pneumomotoru [1]

### 1.3 Zubové pneumatické motory

Jejich konstrukce je velmi jednoduchá a mají menší rozměry než pístové pneumomotory stejného výkonu.

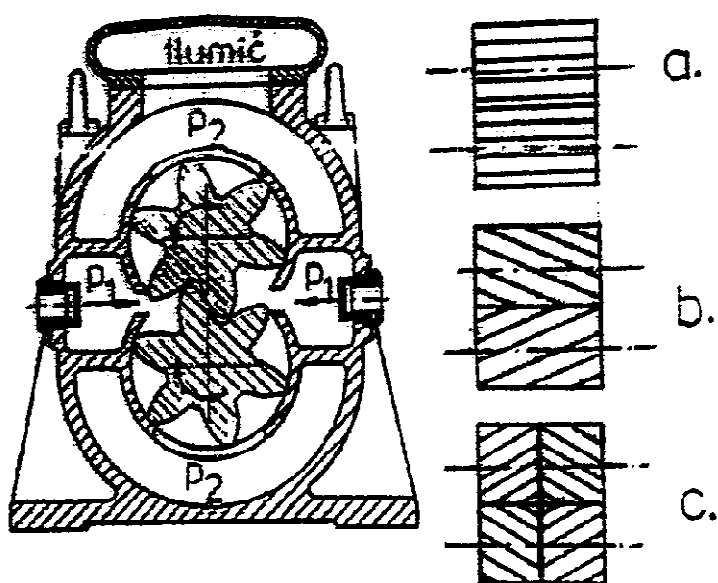
Zubové pneumomotory jsou tvořeny dvěma ozubenými rotory uloženými s velmi malými čelními a obvodovými vůlemi ve skříni pneumomotoru. Ozubené rotory mají zuby přímé, šikmé nebo šípové viz obr 3.

Pneumomotory s přímými a šikmými zuby mohou měnit směr otáčení po změně přívodu vzduchu nebo mechanicky ozubeným převodem. Pneumomotory se šípovými zuby provádějí změnu směru otáčení pouze ozubeným převodem.

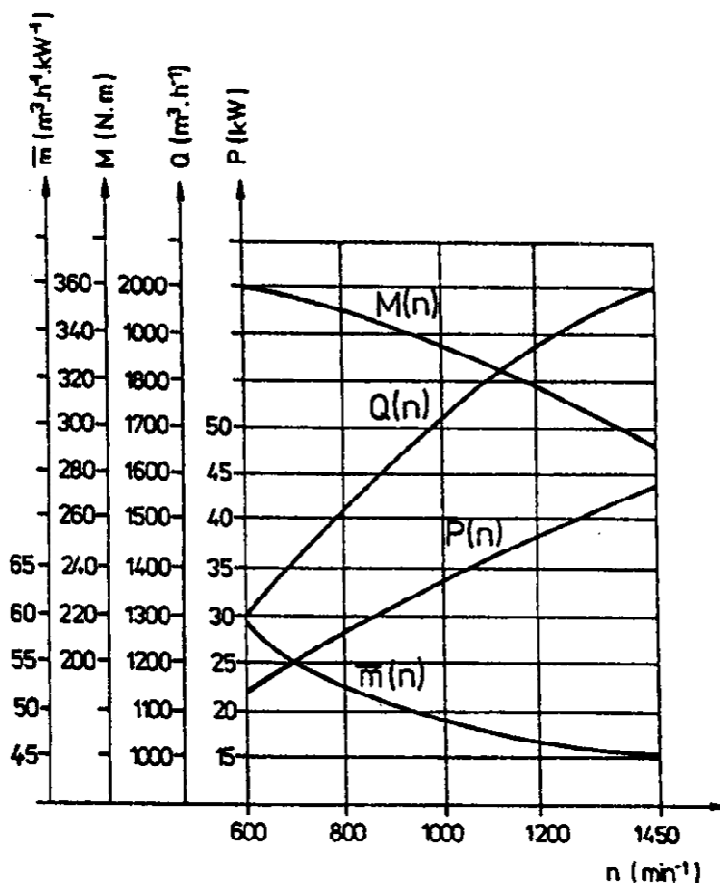
Pro výkony 5 až 15 kW se vyrábějí zubové pneumomotory s přímými zuby a pro výkony 15 až 60 kW zubové pneumomotory se šikmými zuby. Všechny zubové pneumomotory pracují se jmenovitými otáčkami 1500 nebo 3000  $\text{min}^{-1}$ , aby se jimi daly nahradit elektrické motory.

V ČR vyrábí pneumatické zubové pneumomotory akciová společnost OSTROJ Opava v sedmi typech pro výkony od 3 do 40 kW, pro otáčky  $2900 \text{ min}^{-1}$  (nejmenší motor) a  $1450 \text{ min}^{-1}$ . Spotřeba vzduchu se podle výkonu pneumomotoru pohybuje od 300 do  $2000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

V zahraničí se vyrábí zubové pneumomotory několik společností, z nichž nejznámější je Düsterloh, SRN, vyrábějící pneumomotory až do výkonu 66 kW v různých variantách. Speciální konstrukce zubového pneumomotoru této společnosti je provedena jako pneumatický startér pro výkon 4,7 až 44 kW a moment 30 až 330 N·m, který se užívá pro startování spalovacích motorů velkých výkonů [1].



Obr. 3 Zubový pneumomotor [2]

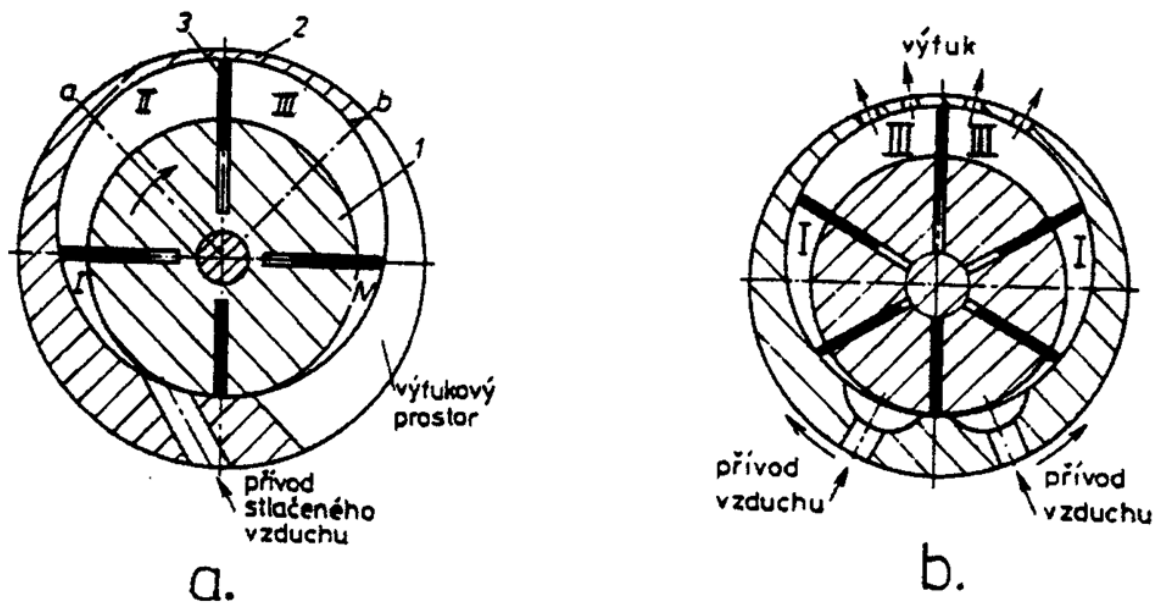


Obr. 4 Charakteristika zubového pneumomotoru [1]

#### 1.4 Lamelové pneumotické motory

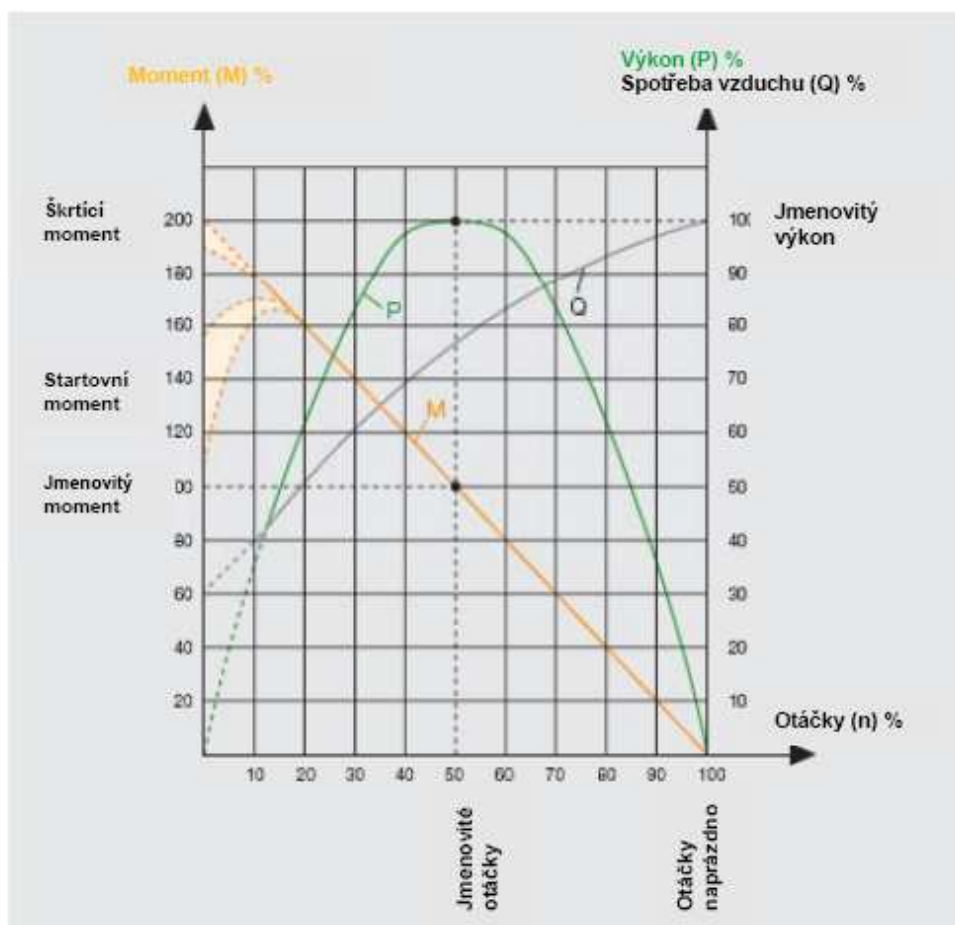
Lamelové pneumomotory jsou nejrozšířenější ze všech výše uvedených pneumomotorů, a to z důvodu širokého rozsahu použití u ručních nástrojů. Jsou často vestavovány přímo do tělesa strojů pro svoji nízkou hmotnost a jednoduchost konstrukce. Lamelové pneumomotory mohou pracovat v jednom směru otáčení jako nereverzační, ale i v obou směrech otáčení při změně přívodu stlačeného vzduchu jako reverzační viz obr. 5. Výhodou lamelových pneumomotorů je snadné připojení na průmyslový rozvod stlačeného vzduchu ve výrobních halách nebo jeho připojení na jiný mobilní zdroj stlačeného vzduchu např. kompresor. Z tohoto důvodu je možné využít lamelový pneumomotor v nejrůznějších odvětvích výroby a montáže. Nejpoužívanějšími pneumaticky poháněnými nástroji jsou např. brusky, vrtačky, utahováky atd..

Rozsah výkonů u vyráběných lamelových pneumomotorů se pohybuje od několika desítek W do 5 kW, v některých případech až 20 kW. Rozsah otáček u lamelových pneumomotorů činí od několika set otáček za minutu až po několik desítek tisíc otáček za minutu. Redukci vysokých otáček lze zajistit pomocí jedno nebo dvoustupňového převodu [1].



Obr. 5 Lamelový pneumomotor [2]

a. nereverzační, b. reverzační

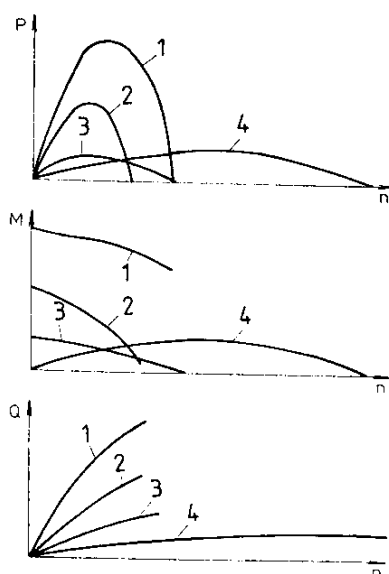


Obr. 6 Charakteristika lamelového pneumomotoru [10]

Tab. 2 Parametry pneumomotorů [1]

Typy motorů	otáčky	výkon
pístové	350 až 1500 min <sup>-1</sup>	2 až 15 kW
zubové s přímými zuby	1500 až 3000 min <sup>-1</sup>	5 až 15 kW
zubové se šikmými zuby	1500 až 3000 min <sup>-1</sup>	15 až 60 kW
lamelové	2000 až 70000 min <sup>-1</sup>	5 až 20 kW

Na zkušebním zařízení lze zkoušet všechny druhy rotačních pneumomotorů, u kterých nepřesahují jejich provozní parametry výkon 6 kW a otáčky 3000 min<sup>-1</sup>.



Obr. 7 Charakteristiky pneumatických motorů [1]

1. zubové pneumomotory, 2. radiální pístové pneumomotory, 3. axiální pístové pneumomotory, 4. lamelové pneumomotory



## 2 MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ, METODY A PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ ( $p$ , $\Delta p$ , $Q$ , $n$ , $M$ , $P$ , $T$ )

### 2.1 Zkoušení pneumatických prvků a systémů

K dosažení požadovaných parametrů a zajištění spolehlivosti funkce pneumatických mechanismů, které jsou významnou součástí zkušebního zařízení pracujících často se značně velkou produktivitou. Je nutné, aby jednotlivé pneumatické prvky zajišťovaly jimi určenou funkci při dosažení projektovaných parametrů s požadovanou spolehlivostí.

Pneumatické prvky se konstruují většinou podle zkušeností, intuice a s využitím různých vzorců. Provádíme jen přibližné výpočty, protože k tomu také vede složitost průtokových poměrů stlačeného vzduchu. Podrobnější pevnostní výpočty se dělají jen v některých případech silových pneumatických prvků.

Parametry a charakteristiky výrobci uvádějí ve svých katalogových listech velmi zřídka, a to jen v jejich jmenovitých hodnotách.

Z těchto důvodů ověřujeme skutečné parametry či charakteristiky různými experimentálními zkouškami. Tyto zkoušky se většinou provádí více či méně složitými postupy [1].

### 2.2 Druhy zkoušek a měření

V technické praxi se setkáváme s těmito druhy zkoušek a měření:

- výzkumné,
- vývojové,
- přejímací a kontrolní,
- provozní.

Výzkumné měření navazuje na teoretickou činnost, která ověřuje existenci jevů očekávaných na podkladě teoretických úvah a výpočtů. Dále shromažďuje podklady pro vytvoření a rozvíjení teorie tam, kde nebyla dosud v potřebné formě vypracována.

Vývojové měření ověřuje především parametry a vlastnosti u nově projektovaných prvků nebo je potřebné při ověřování parametrů a vlastností v jiných pracovních podmínkách nebo při konstrukčních a materiálových změnách. Vývojové měření mohou být často složitá, rozsáhlá a časově náročná. Mohou prověřovat vliv nejrůznějších činitelů,

změnu jejich parametrů, vlastností měřeného prvku. Tyto měření mohou probíhat jak ve statickém, tak i v dynamickém režimu práce prvku. Výsledkem měření jsou podklady, které slouží ke zlepšení konstrukce prvku a tyto lze zaměnit v jeho důležitých částech.

Přijímací a kontrolní měření jsou dány výrobou prvků, které také nazýváme výrobním měřením. Tyto měření jsou často velmi jednoduchá, protože ověřují jen jeden nebo dva parametry. Jejich smyslem je zjištění shody měřeného parametru prvku s parametrem daným v technických podmínkách či v příslušné normě ČSN.

Provozní měření se týkají práce prvku či celého pneumatického zařízení v provozním režimu práce stroje a velmi úzce související technickou diagnostikou [1].

### 2.3 Všeobecné metody měření

Kromě uvedených veličin se podle konstrukčních zvláštností a funkce pneumatického prvku kontrolují dle normy ČSN 10 9006 ještě tyto ukazatele vybrané s ohledem na sledované zkoušky:

- hmotnost,
- pevnost,
- funkčnost,
- těsnost,
- charakteristika průtoková, silová, rychlostní, tlaková,
- hladina akustického výkonu,
- bezpečnost,
- ukazatelé spolehlivosti.

Při přímých měření dostáváme výsledek okamžitě po odečtení údajů z měřicího přístroje. Takovým je např. určování průtoku v pneumatickém systému, a to z údaje průtokoměru, odečítání tlaku z manometru, odečítání údajů z teploměru nebo určování otáček z údaje ručního otáčkoměru atd..

U nepřímých měření získáváme výsledky pomocí výpočtů ze známých vzorců, do kterých dosazujeme jednu nebo dvě naměřené veličiny. Stanovení síly v pístnici přímočarého pneumatického motoru z naměřeného tlaku a dané plochy pístu je typický příklad nepřímého měření.

Spojité snímání měřených parametrů je nezbytné při jakémkoli měření časově proměnných veličin. Neopomenutelné jsou zde převodníky měřených veličin např. tlaku, průtoku, teploty otáček apod. na elektrické. Tyto veličiny mohou být jedině vstupem do registračních měřících přístrojů, ať už pro liniový nebo souřadnicový zápis [1].

## 2.4 Přístroje a snímače pro měření základních parametrů

### 2.4.1 Měření tlaku

Nejčastěji prováděnou úlohou v pneumatických obvodech je měření tlaku a tlakového spádu v pneumatických obvodech. Většinou je měřen přetlak, což je rozdíl barometrického tlaku od absolutního tlaku.

Při měření tlaku jsou nejčastěji používány manometry s deformačním členem. Jako deformační člen slouží Bourdonova trubice vyrábějící se v různých velikostech a provedení. Tyto umožňují snadnou montáž a demontáž [4].

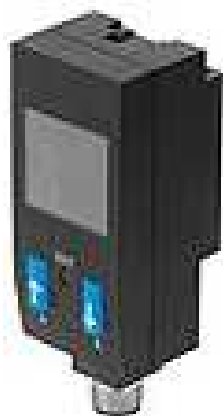
#### Snímače tlaku Festo:

Typ SDET analogový snímač, který umožňuje 8 rozsahů měření tlaku od -1 do 100 bar, je odolný proti vodě a olejům viz obr. 8 [12].



Obr. 8 SDET analogový snímač tlaku[12]

Typ SDE3 je tlakový snímač se světelným displejem umožňující měření tlaku od -1 do 10 bar viz obr. 9 [12].



Obr. 9 snímače tlaku SDE3 [12]

### 2.4.2 Měření průtoku

Nejpoužívanější snímače průtoku jsou objemové průtokoměry [4].

#### Objemové průtokoměry

Používají přímou metodu měření. Jedná se o metodu, která vyhodnocuje objem přímo. Průtokoměry měří objem vzduchu přímo rozdělením objemu do samostatných odměrných prostorů se známým objemem. Po vynásobení známého objemu odměrného prostoru počtem naplněných prostorů, získáme objem vzduchu, který proudí v potrubí.

Méně často se však používají rychlostní průtokoměry, turbínové průtokoměry atd [4].

#### Průtokoměry Festo:

Typ SFE3 je průtokoměr s integrovaným digitálním displejem se vstupem pro jednosměrný průtok. Rozsah měření průtoku je  $0,05\text{-}50\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  a provozní tlak do 7 bar.

Typ SFET-R je pro obousměrný průtok bez digitálního displeje viz obr. 10 [12].



Typ SFE3



Typ SFET-R

Obr. 10 Průtokoměry Festo [12]

### 2.4.3 Měření otáček

V minulosti se používaly ruční otáčkoměry u zařízení s volným koncem hřídele viz obr. 11. Starší chronometrické přístroje se otáčely hodinovým strojkem a měřily otáčky s menší přesností než elektronické přístroje.

Elektronické otáčkoměry jsou rychlejší a přesnější než chronometrické. Snímané otáčky se zobrazují na digitálním displeji s přesností  $\pm 1 \text{ min}^{-1}$  [4].



Obr. 11 Otáčkoměr [9]

### 2.4.4 Měření momentů

Moment síly je určen součinem ramene a síly, která na tomto rameni působí.

$$M = R \cdot F \quad (1)$$

Moment síly (krouticí moment) se měří na hřídeli pomocí deformací, kterou vyvolává. Krouticí moment měříme pomocí torzní tyče.

U nás se nejčastěji používá snímač momentu firmy Virbo Meter, který je konstruován na principu indukčního snímání úhlového zkroucení a bezkontaktního přenosu měřeného elektrického signálu. Tyto snímače se vyrábějí v několika velikostech pro měření momentu od 2 do  $10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$  [4].

Další snímač krouticího momentu se využívají k měření krouticího momentu, otáček a výkonu. Jeho funkce závisí na torzním bezkontaktním principu a je vhodný jak pro statická, tak i pro dynamická měření. Snímač měří s přesností menší než 0,1% z celého rozsahu. Měřicí rozsah je od 0 – 25 000  $\text{N}\cdot\text{m}$  a otáčky od 1 do 50 000  $\text{min}^{-1}$ . Snímač je vybaven integrovanou elektronikou, tzn. výstupní napětí je lineární 0 – 5V (0 - 10V) při obousměrném otáčení. Výsledky měření lze vyhodnocovat přes měřicí kartu v počítači bez dalšího elektronického mezipřenosu nebo přes elektronickou jednotku, která na displeji

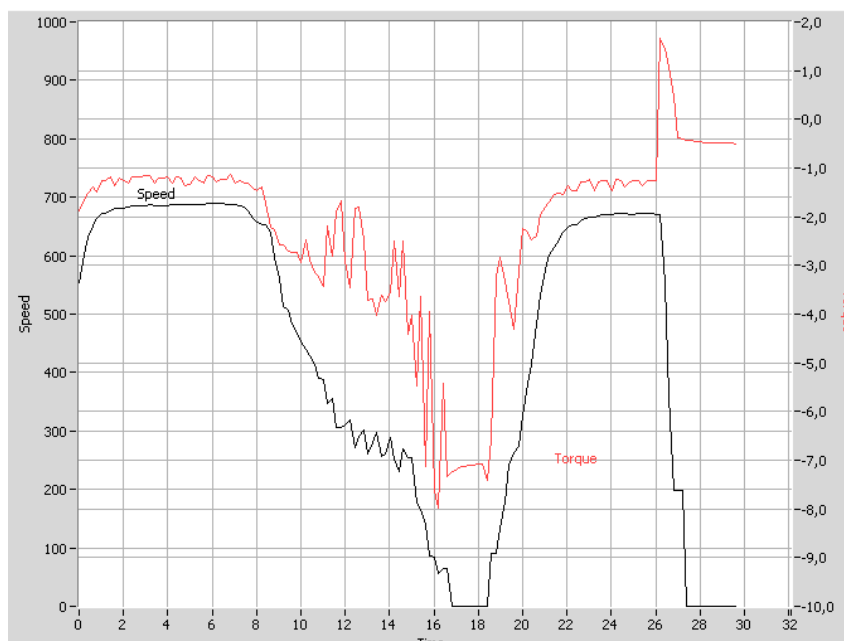
zobrazuje krouticí moment, otáčky a sama vypočítává výkon [9]. Tyto snímače vyrábí např. společnost Magtrol viz obr. 12.



Obr. 12 Snímač krouticího momentu, otáček a výkonu Magtrol

V měřicím programu lze nastavit časový interval měřených veličin. Změny veličin se postupně zaznamenávají v programu a zároveň se zobrazují jako časový průběh krouticího momentu a otáček viz obr. 13. Změny veličin lze vyjmout z programu a vložit je do jiného, kde mohou být dále analyzovány.

Speed	Torque	Time
554.000	-1.876	0.000
602.000	-1.644	0.200
631.000	-1.526	0.400
651.000	-1.394	0.600
664.000	-1.501	0.820
672.000	-1.254	1.000
672.000	-1.252	1.200
677.000	-1.193	1.400
681.000	-1.352	1.610
681.000	-1.210	1.800
682.000	-1.267	2.000
684.000	-1.317	2.200
686.000	-1.183	2.400
686.000	-1.180	2.600
686.000	-1.177	2.800
686.000	-1.165	3.000
687.000	-1.167	3.200
686.000	-1.303	3.400
686.000	-1.210	3.600
686.000	-1.204	3.800
686.000	-1.178	4.000
688.000	-1.315	4.200
688.000	-1.182	4.400
688.000	-1.196	4.600
687.000	-1.350	4.800
688.000	-1.345	5.020
688.000	-1.172	5.200
688.000	-1.251	5.400
688.000	-1.319	5.620
689.000	-1.160	5.820
689.000	-1.172	6.020



Obr. 13 Charakteristiky vyhodnocené snímačem Magtrol

### 2.4.5 Měření teploty

Teplota patří mezi fyzikální veličiny, které se nedají měřit přímo. Proto ji měříme tak, že sledujeme změny různých vlastností látek způsobené změnami teploty.

Teploměry rozdělujeme na:

- mechanické (dilatační),
- elektrické (odporové).

Mechanické teploměry jsou známy jako teploměry rtuťové, jimiž můžeme měřit s přesností s 0,1°C v širokém rozsahu teplot. Rtuťové teploměry jsou velmi křehké, což značně omezuje jejich využití.

Mechanické kovové teploměry pracují na principu teplotních dilatací dvou kovů. Teploměry dvoj-kovové (bimetalické) jsou rozšířené pro svou okamžitou vizuální kontrolu teploty. Jejich rozsah teplot je od -30°C do 100°C. Výhodou tohoto teploměru je jeho možnost vestavění do systému.

Elektrické teploměry jsou konstruovány na principu závislosti odporu na teplotě nebo na principu termoelektrického jevu. V prvním případě používáme buď kovových čidel, v tomto případě jde o lineární závislost odporu na teplotě nebo polovodičů - termistorů, jejichž odpor je exponenciálně závislý na teplotě [4].



Obr. 14 Dvojkový teploměr [9]

### 2.4.6 Snímače Hydrotechnik

Měření tlaku, průtoku, teploty a otáček je možno provádět pomocí snímačů od společnosti Hydrotechnik.

- Snímače tlaku měří v rozsahu (0÷600) bar s přesností  $\pm 0,25\%$  viz obr. 15,
- snímače teploty měří v rozsahu (-50÷200) °C s přesností  $\pm 1\%$ ,
- snímače průtoku společnost Hydrotechnik vyrábí ve dvou variantách.
  - Turbínové měří v rozsahu (1÷600) l·min<sup>-1</sup> s přesností  $\pm 0,5$
  - Zubové měří v rozsahu (1÷300) l·min<sup>-1</sup> s přesností  $\pm 0,4$



Obr. 15 Snímač tlaku [14]

Na měřených místech odvodu jsou přes přípojky minimess zapojeny výše uvedené snímače viz obr. 16.



Obr. 16 přípojka minimess [14]

Snímač otáček se připevní přímo k rotační části a snímá otáčky pomocí infračerveného světla zachycujícího reflexní značky na rotační části viz obr. 17.



Obr. 17 Snímač otáček [14]



Při měření veličin měřeného obvodu jsou jednotlivé snímače připojeny k měřicímu systému M5050 Hydrotechnik nebo M5060 Hydrotechnik viz obr. 18. Měřicí systém zaznamenává měřená data, která jsou následně přenesena do PC. Naměřená data jsou vyhodnocena pomocí software HYDROcomsys/win nebo MS Excel.



Obr. 18 Měřicí systém Hydrotechnik M5060 [14]

#### 2.4.7 Zhodnocení snímačů

Pro zjištění parametrů zkušebního zařízení existuje řada dalších snímačů a zařízení, které nejsou uvedeny. Z uvedených snímačů volím ke snímání krouticího momentu, otáček a výkonu snímač Magtrol. Tento pracuje nezávisle na brzdícím zařízení a naměřené údaje zaznamenává a vyhodnocuje pomocí software.

K měření průtoku a tlaku volím snímače Hydrotechnik, které jsou připojeny měřicí systém M5060 Hydrotechnik, kde jsou zaznamenány a následně přeneseny do PC. Zařízení Hydrotechnik může zaznamenávat více veličin současně a vyhodnotit je pomocí software.

### 3 BRZDÍCÍ ZAŘÍZENÍ – ALTERNATIVY

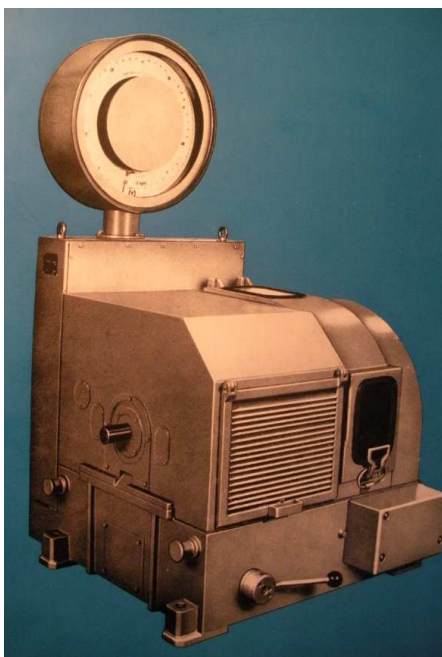
#### 3.1 Elektrické dynamometry

Stejnoseměrné dynamometry slouží k přenosnému, pohodlnému, úspornému měření točivého momentu a výkonu viz obr. 19. Moment měřeného stroje přivedený na hřídel dynamometru se působením elektromagnetických a vnitřních mechanických sil plně přenáší na stator výkyvně uložený ve stojanových ložiskách.

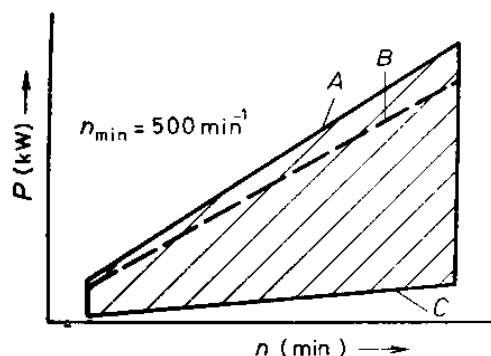
Vysoké přesnosti měření je dosaženo konstrukčním uspořádáním statorových ložisek ve štítech výkyvného statoru. Také vhodným řešením ventilačního obvodu, přívodních vodičů i vysokou přesností měřicích elementů způsobuje vyšší přesnost měření. Stupnice váhy je cejchována na kpm nebo N·m.

V motorickém chodu je dynamometr napájen z rekuperačního soustrojí skládajícího se z dynamu pohánějícího asynchronní elektromotor, který působí jako zátěž. Tohoto způsobu zatížení se používá při laboratorních měřeních ztrát všech druhů elektrických strojů točivých, spalovacích motorů a čerpadel, dále na zkušebnách elektrických strojů při zkoušení alternátorů a dynam. Při zkoušení spalovacích motorů měří se průměrný moment během jedné otáčky.

V generátorickém chodu je dynamometr poháněn měřeným strojem. Pracuje tedy jako elektrická brzda. Vyrobená elektrická energie se prostřednictvím rekuperačního soustrojí vrací do sítě. Tohoto energeticky výhodného způsobu se používá hlavně při zatěžování elektrických spalovacích motorů. Dynamometry mohou pracovat v obou směrech točení. [8].



Obr. 19 Stejnoseměrný dynamometr

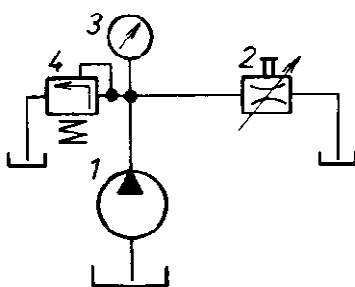


Obr. 20 Charakteristika stejnosměrného dynamometru

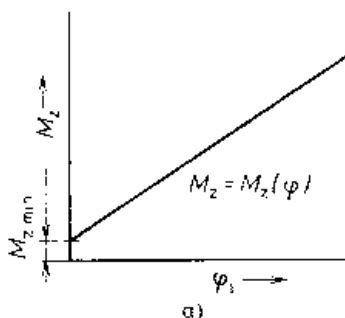
### 3.2 Hydrostatické brzdy

Hydrogenerátor je spojen s brzděným pneumomotorem a do jeho výtlaku je zařazen proměnný hydraulický odpor způsobený škrtícím nebo přepouštěcím ventilem, kterým se zatěžuje hydrogenerátor. Následně se na hřídeli vytváří větší či menší točivý moment, který má charakter brzdného momentu viz obr. 22. Velikost momentu lze stanovit z hodnoty geometrického objemu hydrogenerátoru, z ověřené hodnoty jeho účinnosti a změřeného tlaku na manometru na výstupu z hydrogenerátoru viz obr. 21. Při požadavku brzdění v obou směrech a pro možnost programovatelného brzdného účinku je hydrostatická brzda poněkud složitější.

Hydrostatická brzda má menší rozměry než stejnosměrný dynamometr. Při větších brzdných výkonech lze dosáhnout vysokých teplot, proto je nutné chlazení [5].



Obr. 21 Hydrostatická brzda [5]



Obr. 22 Zatěžovací charakteristika hydrostatické brzdy [5]

### 3.3 Třecí brzdy

Třecí brzdy mění pohybovou energii, kterou dodává hnací stroj v teplo povrchovým třením tuhých těles (špalíků, pásů, pásů) po obvodu hřídele nebo samostatného brzdového kotouče. Výhodou třecích brzd je nízká cena a jednoduchá konstrukce. Avšak třecí brzdy mohou pracovat pouze s nízkými otáčkami z důvodu špatného odvádění tepla. Působení brzdy při vyšších otáčkách může dojít k poškození tuhých těles [6].

#### 3.3.1 Čelistové brzdy.

**Jednočelistové** brzdy se používají u malých momentů ručního pohonu. Při ubrzdování většího momentu by vznikla značná přitlačná síla, která by způsobovala velký průhyb hřídele. Podmínka rovnováhy na brzdě je, že ubrzděný moment se rovná momentu vnějších sil [6].

$$M_u = M \quad (2)$$

$$M_u = F_T \cdot \frac{D}{2} = F_N \cdot f \cdot \frac{D}{2} \quad (3)$$

**Dvoučelistové** brzdy lze použít také u větších momentů, jelikož čelisti působí proti sobě a zabraňují ohybu hřídele. Mají-li obě čelisti vyvodit stejné brzdné účinky, musí otočné body pak ležet na tečnách obvodu brzdového bubnu. Ubrzděný moment má velikost  $M_u$ . [6].

$$M_u = 2F_T \cdot \frac{D}{2} = F_N \cdot f \cdot D \quad (4)$$

### 3.3.2 Brzdy s osovým tlakem

U těchto brzd vyvozuje brzdný moment třecí síla působící ve směru osy hřídele brzdy. Podle tvaru brzdných ploch je dělíme na lamelové, kuželové a kotoučové.

Konstrukce **lamelových brzd** umožňuje při stejných rozměrech docílit větších brzdných ploch než u brzd čelistových. Pro stejný ubrzděný moment vychází menší měrné tlaky v třecích plochách, což snižuje opotřebení materiálů. Jsou odolné vůči prachu, vlhkosti a dalším nepříznivým účinkům prostředí. Nevýhodou je však špatný odvod tepla u provedení s více lamelami.

**Kuželové brzdy** při stejném středním poloměru  $R_s$  a stejné šířce třecí plochy je ubrzděný moment až třikrát větší než u lamelových. Nevýhodou je velká citlivost na provedení geometrie třecích ploch a u větších přítláčných sil nebezpečí hrozí „zakousnutí“. Používají se zabudované přímo do elektromotorů, kde jsou ovládány elektromagnety.

**Kotoučové brzdy** mají perspektivní konstrukci, která může být při určitých obměnách použita i v transportních zařízeních. Na rozdíl od lamelových brzd nedochází u nich k tak velkému přehřívání brzdných elementů, protože jen část povrchu kotouče (asi 10 až 15%) je ve styku s čelistí. Pro zbývající část otáčky se může kotouč ochlazovat. Kotoučové brzdy se používají převážně u automobilů [6].

### 3.3.3 Zhodnocení brzd

Tab. 3 Přehled parametrů brzd [5]

Typ brzdy	Rozsah parametrů		
	Výkon kW	Moment N·m	Otáčky min <sup>-1</sup>
Elektr. dynamometr	3 až 800	20 až 8000	300 až 3000
Hydrodynamická	2 až 1000	10 až 6000	200 až 10000
Hydrostatická	0,5 až 50	1 až 100	100 až 8000
Třecí	0,1 až 5	0,5 až 50	10 až 200

Podle výše uvedené tabulky volím hydrostatickou brzdu, protože se nejvhodněji přibližuje zadaným parametrům.

Další možnou brzdící alternativou je trojfázový asynchronní motor s kotvou na krátko. Tento způsob brzdění lze využít tak, že se motor chová jako generátor. Frekvenci otáčení magnetického pole měníme frekvenčním měničem a vracíme vyrobenou energii zpět do sítě. Trojfázovým asynchronním motorem je možné brzdit pouze od otáček kolem 200 min<sup>-1</sup>, proto pro dosažení nulových otáček použijeme i třecí brzdu. Tento provoz brzdění by se mohl provozovat pouze krátkodobě, protože při nízký by došlo poškození vinutí motoru. Další nevýhodou tohoto zařízení je vysoká pořizovací cena.

## 4 SCHÉMA ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ

### 4.1 Popis zkušebního zařízení pro jeden směr otáčení

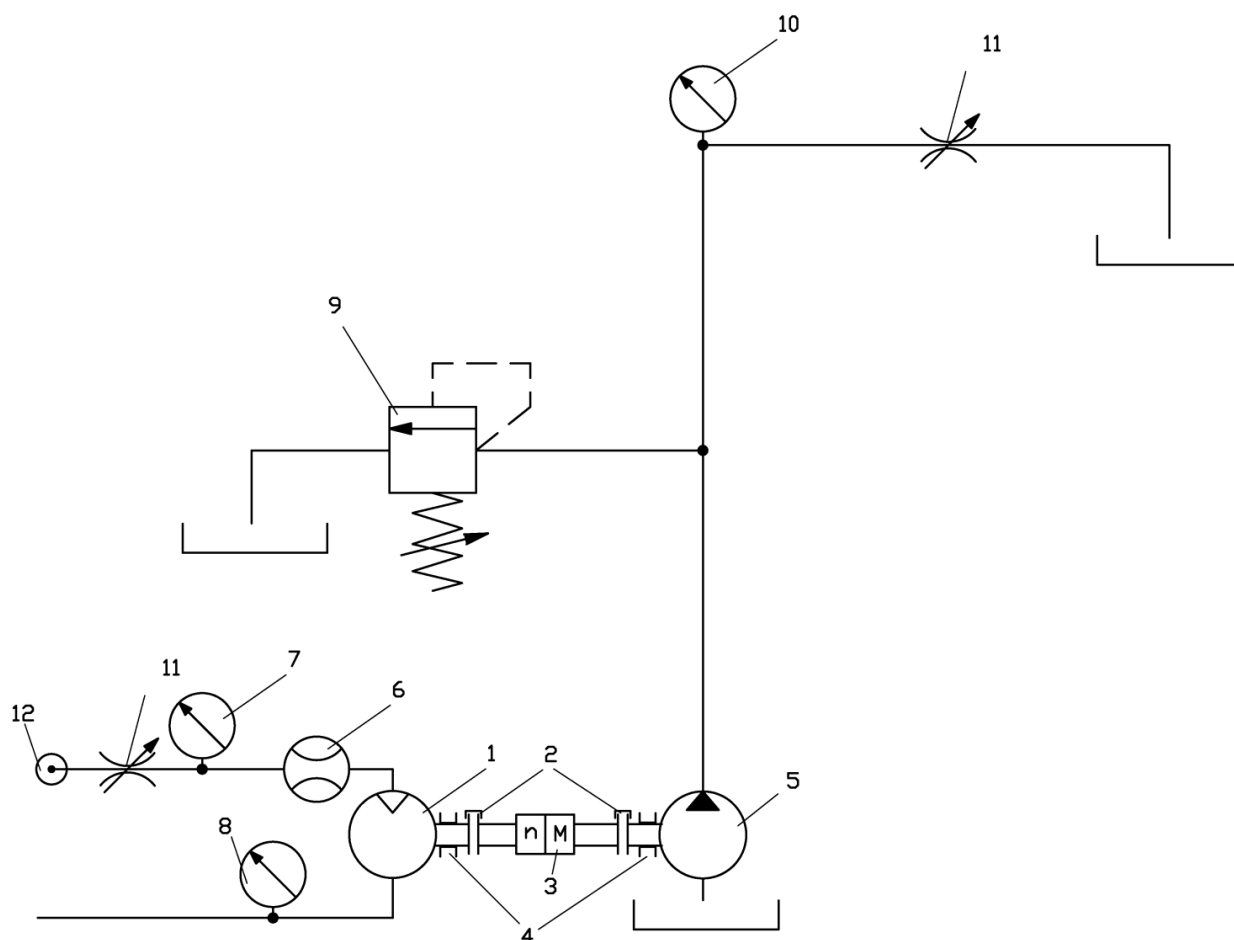
Zkoušený rotační pneumomotor pohání rotační hydrogenerátor pomocí hřídele. Na výstupu z hydrogenerátoru je připojen pojistný ventil, na kterém je nastaven maximální tlak v hydraulickém obvodu. Dále na výstupu je připojen škrťací ventil, který reguluje průtok kapaliny v obvodu a otáčky hydrogenerátoru. Zároveň se změnou otáček hydrogenerátoru se mění i otáčky pneumomotoru. Hydraulický obvod složí jako hydrostatická brzda k vytváření zátěže na pneumomotoru. Na vstupu a výstupu z pneumomotoru jsou umístěné snímače tlaku a průtoku, které jsou jednotlivě připojeny k měřicímu systému M 5050 Hydrotechnik. Tento systém zaznamenává naměřená data do PC, kde jsou vyhodnocena pomocí software MS Excel. Mezi zkoušeným pneumomotorem a hydrogenerátorem je umístěn snímač Magtrol, který snímá krouticí moment, otáčky a výkon. Snímač opět zaznamenává naměřená data do PC, kde jsou vyhodnocena pomocí vhodného software.

Výhody:

- Zkušební zařízení je univerzální pro všechny pneumomotory, které se shodují se zadanými parametry.
- Možnost dlouhodobého zatížení je ale omezeno přípustnou dosaženou teplotou max. 65°C. Pro případ překročení této teploty by bylo nutno použít chlazení v odpadu do nádrže.
- Snadné, rychlé a přesné vyhodnocení parametrů zkoušených pneumomotorů.

Nevýhody:

- Zkušební zařízení může pracovat pouze v jednom směru otáčení. Pokud by bylo požadováno použití pneumomotoru v obou směrech otáčení, bylo by potřebné toto zkušební zařízení rekonstruovat.



Obr. 23 Zkušební zařízení pro jeden směr otáčení

1. zkoušený pneumomotor, 2. pružná spojka 3. Snímač momentu, otáček a výkonu Magtrol, 4. valivé ložisko, 5. hydrogenerátor, 6. snímač průtoku, 7. 8. 10. manometr, 9. Pojistný ventil, 11. Škrťací ventil, 12. zdroj tlaku

#### 4.2 Popis zkušebního zařízení pro dva směry otáčení

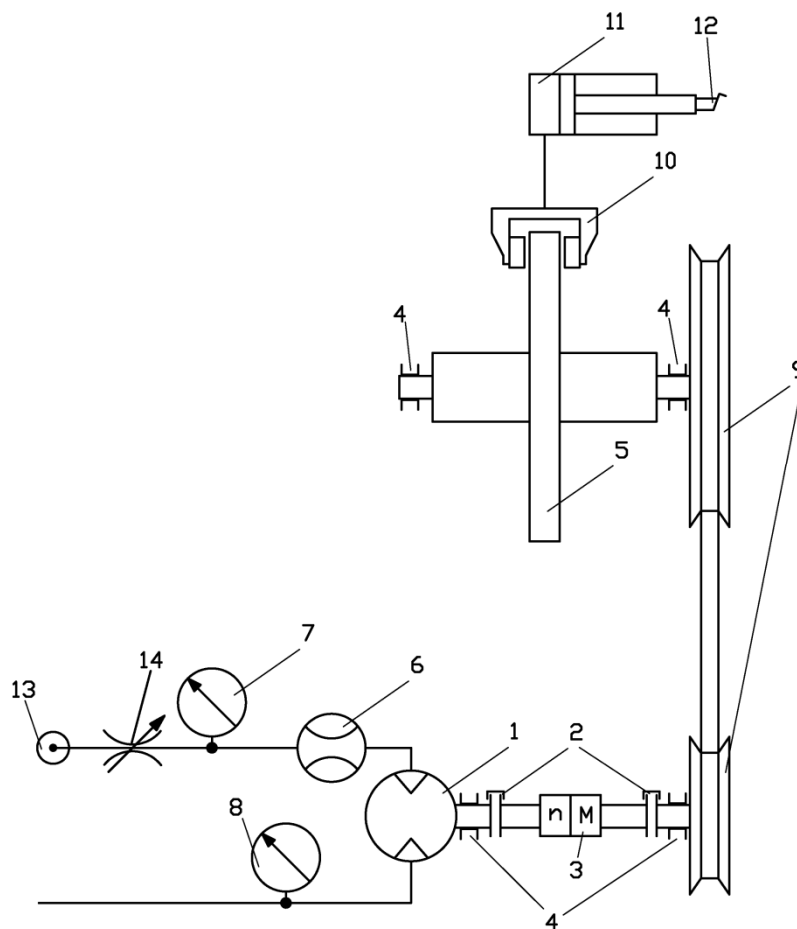
Zkoušený rotační pneumomotor pohání řemenový převod pomocí hřídele. Přes řemenový převod je poháněn hřídel s umístěným třecím kotoučem. Kotouč je brzděn hydraulicky ovládanou kotoučovou brzdou. Působením kotoučové brzdy na třecí kotouč je vytvářena zátěž na zkoušený pneumomotor. Na vstupu a výstupu z pneumomotoru jsou umístěné snímače tlaku a průtoku, které jsou jednotlivě připojeny k měřicímu systému M 5050 Hydrotechnik. Tento systém zaznamenává naměřená data do PC, kde jsou vyhodnocena pomocí software MS Excel. Mezi zkoušeným pneumomotorem a poháněným řemenovým převodem je umístěn snímač Magtrol, který snímá krouticí moment, otáčky a výkon. Snímač opět zaznamenává naměřená data do PC, kde jsou vyhodnocena pomocí vhodného software.



## Výhody:

- Zkušební zařízení je univerzální pro všechny pneumomotory, které se shodují se zadanými parametry.
- Zkušební zařízení může pracovat v obou směrech otáčení dle typu zkoušeného pneumomotoru.
- Snadná regulace zatížení.
- Snadné, rychlé a přesné vyhodnocení parametrů zkoušených pneumomotorů.

Nevýhodou zkušebního zařízení je provoz při horní hranici otáček. Při dlouhodobém vyvození zátěže třecí brzdou na třecí kotouč, dochází ke vzniku vysokých teplot, které není snadné odvádět. Při praktické ukázce zkušebního zařízení ve společnosti Koexpro stačilo vyvodit při měření zátěž jen po dobu cca 30 sekund a zkoušený motor byl vyhodnocen. Není proto nutné zkušební zatížení vystavovat dlouhodobé zátěži.



Obr. 24 Schéma zkušebního zařízení pro obousměrné otáčení

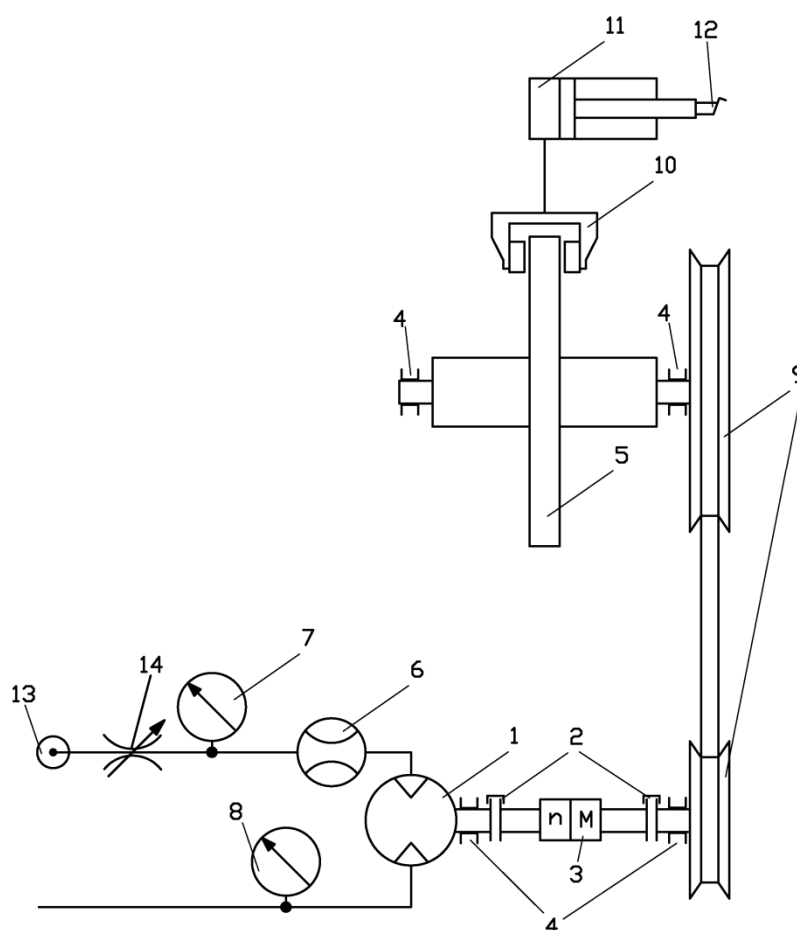
1. zkoušený pneumomotor reverzační, 2. pružná spojka 3. Snímač momentu, otáček a výkonu Magtrol, 4. valivé ložisko, 5. třecí kotouč, 6. snímač průtoku, 7. 8. manometr, 9. řemenový převod, 10. třecí brzda, 11. hydraulický válec, 12. pedál, 13. zdroj tlaku 14. škrťací ventil



Obr. 25 zkušební zařízení pro obousměrné otáčení společnosti Koexpro [13]

## 5 Závěr

Výsledkem bakalářské práce je schéma zkušebního zařízení pro dva směry otáčení. Navržené zkušební zařízení pro rozsah výkonů do 6 kW a do max. otáček 3000 za min. je vybaveno snímači a měřicími přístroji, které snímají parametry zkoušeného pneumomotoru a vyhodnocuje naměřené hodnoty v PC pomocí software. Software vyjádří naměřené hodnoty číselně, ale i graficky jako charakteristiky viz obr. 13. Zkušební zařízení je dále vybaveno třecí kotoučovou brzdou, která vytváří zátěž na zkoušený pneumomotor. Otáčky pneumomotoru jsou příliš vysoké pro dlouhodobé zatěžování kotoučovou třecí brzdou, proto jsou sníženy řemenovým převodem. Všechny stanovené cíle bakalářské práce byly splněny.



Obr. 26 Schéma obousměrného otáčení

1. lamelový pneumomotor reverzační, 2.lamelový hydrogenerátor reverzační
- 3.pojistný ventil, 4.rozvaděč s mžikovým přestavením, 5.manometr, 6.snímač momentu, otáček a výkonu, 7.můstek, 8.chladič, 9.přepouštěcí ventil.

## 6 ZDROJE

- [1] KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy díl 1. Pneumatické prvky a systémy*. 2. vydání, Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005. 275 s. Fakulta strojní. ISBN 80-248-0879-X
- [2] KOPÁČEK, J., ŽÁČEK, M. *Pneumatická zařízení strojů*. Ostrava: VŠB-TUO, 2008. 94 s. Fakulta strojní. ISBN 978-80-248-0442-2
- [3] KOPÁČEK, J., PAVLOK, B. *Tekutinové mechanismy*. Ostrava: VŠB-TUO, 2005. 2. vydání 156s. ISBN 80-248-0856-0
- [4] KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Praha: SNTL, 1990. 159s. ISBN 80-248-0692-4
- [5] PIVOŇKA, J. a kolektiv *Tekutinové mechanismy*. Praha: SNTL, 1987. 624 s. ISBN 04-225-87
- [6] MYNÁŘ, V. a kolektiv *Části strojů*. Ostrava: VŠB-TUO, 1979. 398 s. ISBN 978-80-248-1907-5
- [7] BAŠUS, V. a kolektiv *Příručka měřicí techniky pro strojírenství a energetiku*. Praha: SNTL, 1965. 924s.
- [8] Firemní katalogy SMC, MEZ VSETÍN
- [9] *Magtrol* [online]. 2010 [cit. 2010-04-18] Snímače krouticího momentu. Dostupné z WWW:  
<[http://www.mericipristroje.cz/index.php?soubor=text/snimace\\_kr\\_mom.html](http://www.mericipristroje.cz/index.php?soubor=text/snimace_kr_mom.html)>
- [10] *Deprag* [online]. 2010 [cit. 2010-04-18] Pneumatické motory. Dostupné z WWW:  
<<http://www.deprag.com/download/prospekt-pdf/D6000cs.pdf>>
- [11] *Festo* [online]. 2010 [cit. 2010-04-18] Průtokoměry. Dostupné z WWW:  
[http://www.festo.com/cms/cs\\_cz/9699.htm](http://www.festo.com/cms/cs_cz/9699.htm)>
- [12] *Festo* [online]. 2010 [cit. 2010-04-18] Tlaková a vakuová čidla. Dostupné z WWW:  
<[http://www.festo.com/cms/cs\\_cz/9704.htm](http://www.festo.com/cms/cs_cz/9704.htm)>
- [13] *Koexpro* [online]. 2010 [cit. 2010-04-18] Zařízení pro měření krouticího momentu ZM Mk 200. Dostupné z WWW:  
<<http://www.koexpro.cz/new/koex/?menu=page&lang=cz&id=483>>
- [14] *Hydrotechnik* [online]. 2010 [cit. 2010-04-18] Products. Dostupné z WWW:  
<<http://www.hydrotechnik.com/english/html/products.html>>

### *PODĚKOVÁNÍ*

Poděkování vedoucímu mé bakalářské práce panu prof. Ing. Jaroslavovi Kopáčkovi, CSc. za odborný výklad na všechny mé otázky a pomoc při vypracování bakalářské práce.

V Ostravě, dne 21. května 2010



.....